

О. В. Калюжний¹, В. Л. Калюжний², О. В. Холявік², А. В. Байханов²

Кременчуцький національний технічний університет імені Михайла Остроградського¹
 Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені
 Ігоря Сікорського»²

СКОРОЧЕННЯ ПЕРЕХОДІВ ХОЛОДНОГО ЛИСТОВОГО ШТАМПУВАННЯ ПРИ ВИГОТОВЛЕННІ ПОРОЖНИСТИХ КОНУСНИХ ВИРОБІВ З МІДІ

Розглянуто скорочення кількості переходів при холодному штампуванні з мідної листової заготовки порожнистих конусних виробів, які по традиційній технології штампують витягуванням за чотири переходи. На першому переході шляхом витягування в конусній матриці виготовлено напівфабрикат з конусною і циліндричною частинами. На другому переході здійснено обтиск циліндричної частини і отримано готовий конусний виріб. Методом скінченних елементів з використанням програми DEFORM-2D і пружно-пластичної моделі металу створено математичні моделі та проведено розрахунковий аналіз переходів витягування обтиску. При моделюванні обтиску враховано накопичені деформації і вичерпаний ресурс пластичності у здеформованому металі після витягування. Для витягування використано матрицю спеціального профілю з конусною поверхнею у вигляді виступів і впадін, що дозволило зменшити зусилля витягування і збільшити ступінь деформації та виконати витягування за один перехід. Для двох переходів формоутворення виробу встановлено залежності зусиль деформування від переміщення інструменту. Визначено розподіли компонент напружень, деформацій, вичерпаного ресурсу пластичності та форму і розміри напівфабрикату після витягування. Аналогічні дані отримано для переходу обтиску. Пропрацювання структури металу холодною пластичною деформацією оцінено по розподілах інтенсивності деформацій в об'ємах напівфабрикату і виробу.

Ключові слова: конусний виріб; витягування і обтиск; метод скінченних елементів; напівфабрикат; зусилля деформування; розподіли напружень і деформацій; форма і розміри напівфабрикату та виробу.

O. Kaliuzhnyi, V. Kaliuzhnyi, O. Kholiavik, A. Baykhanov

REDUCTION OF COLD-SHEET STAMPING TRANSITIONS IN THE MANUFACTURING OF HOLLOW CONE PRODUCTS FROM COPPER

The paper considers the reduction of the number of transitions in cold stamping of hollow cone products from copper sheet billets, which are stamped by drawing in four transitions according to the traditional technology. In the first step, a semi-finished product with conical and cylindrical parts is produced by drawing in a cone die. In the second step, the cylindrical part is crimped and the finished cone product is obtained. Mathematical models were created by the finite element method using the DEFORM-2D program and an elastic-plastic model of the metal, and a computational analysis of the stretching and compression transitions was performed. The modeling of compression took into account the accumulated deformations and the exhausted plasticity resource in the deformed metal after stretching. For drawing, a special profile matrix with a conical surface in the form of protrusions and depressions was used, which made it possible to reduce the drawing force and increase the degree of deformation and perform drawing in one pass. For two transitions of the product forming, the dependence of deformation forces on tool displacement was determined. The distributions of stress components, deformations, exhausted plasticity resource, and the shape and dimensions of the semi-finished product after drawing were determined. Similar data were obtained for the compression transition. The development of metal structure by cold plastic deformation is estimated by the distributions of deformation intensity in the volumes of semi-finished product and product.

Keywords: conical product; stretching and compression; finite element method; semi-finished product; deformation forces; stress and strain distributions; shape and dimensions of semi-finished product and product.

Постановка проблеми. Порожністі конусні деталі з мідрізнних розмірів складовою частиною виробів спеціального призначення, що виготовляються великими серіями. Ескіз однієї з таких деталей, для якої потрібно розробити технологію штампування, приведено на рис. 1. Традиційна технологія отримання порожнистих конусних виробів – це витягування з листової заготовки. При цьому в залежності від величини відношення висоти конусної деталі h до

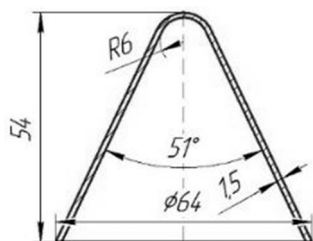


Рис. 1. Ескіз виробу

зовнішнього діаметру d та значення кута твірної конусу α такі деталі згідно відомої класифікації розподілені на три групи: низькі, середні та високі. Найбільші складнощі виникають при витягуванні високих конусних деталей, для яких $h/d = 0,8 \div 1$ і $\alpha = 10^\circ \div 30^\circ$. Для таких деталей застосовують витягування за 4-6 переходів. З урахуванням серійності виробництва для цього потрібно виготовити певну кількість штампового оснащення та використовувати відповідно таку ж кількість кривошипного пресового обладнання. Використання

багато перехідного витягування приводить до значної різнотовщинності стінки по довжині деталі по причині потовщення, яке має місце при формоутворенні витягуванням, та потоншення стінки на радіусі заокруглення пуансонів.

Сучасне листове штампувальне виробництво ставить задачі збільшення продуктивності виготовлення та покращення якості деталей. Зростання продуктивності можна забезпечити скороченням кількості переходів штампування, а покращення якості відбудеться завдяки підвищенню точності форми і розмірів деталей. Відомо із практики штампування порожнистих конусних виробів із сталі, що застосування операції обтиску дозволяє зменшити кількість переходів витягування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Використання різних підходів у методі скінченних елементів (МСЕ) для аналізу пластичної деформації та оптимізації процесів обробки металів тиском описано в монографії [1]. Результати скінченно-елементного моделювання процесів листового штампування в умовах холодної та гарячої пластичної деформації наведено в роботі [2]. У джерелі [3] викладено способи і дослідження з використанням МСЕ і програми DEFORM по інтенсифікації процесів холодного листового штампування.

У дослідженні [4] з використанням МСЕ і програмного забезпечення DEFORM 2D було визначено вплив температури заготовки, радіусу матриці та швидкості деформування на характеристики глибокого витягування порожнистого виробу із алюмінію 7075. Встановлено, що температура заготовки має найбільший вплив на формозміну алюмінієвого матеріалу, за якою слідують швидкість деформування та радіус матриці.

В роботі [5] і чисельним моделюванням досліджено новий процес гідромеханічного глибокого витягування з незалежним радіальним тиском для отримання деталей з великим відношенням висоти до діаметру. На прикладі тонкостінної конічної чашки з алюмінієвого сплаву 5A06 вивчено вплив шляхів гідравлічного навантаження та раціональних співвідношень радіального тиску на розміри стінок. Результати показали, що правильне поєднання тиску в рідинній камері і незалежного радіального тиску може ефективно стримувати виникнення тріщини на дні конусу і дефектів у вигляді гофр в області конічної стінки деталі, покращити рівномірність розподілу товщини стінки і якість формоутворення в процесі витягування.

Шляхом моделювання в скінченно-елементній програмі DEFORM розроблено технологію одноперехідного витягування без притискача великогабаритної деталі [6]. Встановлено зусилля деформування та геометричну форму деформуючого інструменту для забезпечення якісного виготовлення деталі.

За допомогою програмного забезпечення ANSYS15 було досліджено вплив зазору та товщини круглій пластини із латуні CuZn37 на зусилля деформування та розподіл напружень, деформацій і гофроутворення при витягуванні еліптичної порожнистої деталі [7]. Розглянуто товщини 0,8, 0,9 і 1 мм та зазори між пуансоном і матрицею 0,8, 0,9, 1 і 1,1 мм при витягуванні без притискача. Встановлено, що зазор величиною 0,9 мм дає найкращі результати при формоутворенні.

За допомогою програми ABAQUS/EXPLICIT FEA в роботі [8] розроблено скінченно-елементну модель для 3D моделювання процесу глибокого витягування з урахуванням анізотропії матеріалу заготовки. Модель дозволяє прогнозувати розподіл товщини і потоншення заготовки в залежності від параметрів матриці та визначати зусилля на пуансоні і притискачі. Встановлені параметри не потребують проведення дорогих виробничих випробувань.

Для дослідження впливу температури, швидкості деформації та анізотропії при витягуванні в конусній матриці було використано моделювання в ANSYS APDL [9]. Встановлено зусилля деформування та напружений стан металу під час витягування.

Тривимірною скінченно-елементною моделлю витягування в конусній матриці циліндричних порожнистих виробів була побудована за допомогою комерційного скінченно-елементного пакету ANSYS/APDL-19 в роботі [10]. Пуансоном з плоским торцем витягуванню підлягали заготовки з матеріалів AA8011 та AA1200. Найкращі результати по витягуванню отримано в матриці з кутом конусу 36°.

Моделювання в ANSYS використано для опису складної поведінки металу при витягуванні циліндричного порожнистого виробу [11]. Визначено розміри матриці і пуансону для отримання виробу без дефектів та силові режими формоутворення.

Чисельне моделювання МСЕ та експериментальні дослідження по витягуванню з прикладанням ультразвукових коливань до матриці проведено в роботі [12]. Досліджено вплив амплітуди і частоти коливань на поведінку металу при формоутворенні порожнистого виробу.

Прикладання коливань дозволило суттєво зменшити зусилля витягування, але при цьому спостерігалося сильне потоншення, яке в певних умовах приводило до руйнування.

Автором [13] відмічено, що результати моделювання процесів витягування в ANSYS відповідають експериментальним даним і дозволяють прогнозувати утворення дефектів у вигляді гофр, тріщин і фестонів. При низькому тиску на притискачі виникають гофри, а високий тиск приводить до зменшення товщини і появи тріщин у виробі.

Дослідження по визначенню з урахуванням анізотропії оптимальної форми заготовки для витягування порожнистих виробів довільної форми з рівномірним припуском на обрізку на фланці приведено в джерелі [14]. Результати моделювання в ANSYS, що відповідають експериментальним даним, перевірено на прикладах витягування трьох деталей.

Вплив товщини заготовки на витягування із алюмінію AL99.5w і латунного сплаву CuZn37 квадратних коробок в конусній матриці вивчено в роботі [15]. Виконано моделювання за допомогою MCE та проведено експериментальні дослідження, які показали узгодженість між результатами по зусиллю деформування, граничним коефіцієнтам витягування та вірогідності руйнування.

Автором [16] вказано, що використання програми ANSYS є ефективним для моделювання процесів витягування та дозволяє отримати необхідні результати для проектування технології. В статті досліджуються дефекти у вигляді гофр, утворення фестонів та руйнування листового металу. Пропонуються шляхи зменшення виникнення дефектів.

Моделювання MCE та відповідні експерименти було проведено для дослідження впливу сили притискача заготовки, радіусу пуансону та коефіцієнту витягування на руйнування циліндричних порожнистих виробів при витягуванні [17]. Результати показали хорошу узгодженість між розрахованою та виміряною висотою зони руйнування.

Моделюванням з використанням ANSYS LS-DYNA в джерелі [18] встановлено вплив зусилля притискача на товщину листа та утворення гофр при витягуванні виробу із AL 1050. Результати розрахунків підтверджено експериментальними даними.

Авторами [19] процес витягування з урахуванням анізотропії композиту в прямому і зворотному напрямках розраховано за допомогою скінченно-елементного програмного забезпечення Dynaform. За результатами моделювання спроектовано штамп та проведено фізичні експерименти.

Шляхом моделювання в середовищі DEFORM 3D в роботі [20] розглянуто причини виникнення дефектів у вигляді фестонів при витягуванні. Визначено, що на утворення фестонів значний вплив має форма вихідної заготовки разом з анізотропією, зусиллям притискача і тертя на пуансоні і матриці.

Авторами [21] з використанням MCE і програми DEFORM 2D досліджено новий спосіб пластичного формоутворення порожнистих конусних виробів шляхом прямого-зворотного видавлювання. Новий спосіб забезпечує створення активних сил тертя при течії металу в обох напрямках, що забезпечує деформування при зменшених силових режимах.

В джерелі [22] проведено моделювання в програмі DEFORM 2D трьох варіантів витягування з притискачем порожнистих виробів із листових заготовок. Розглянуто традиційне витягування, витягування з використанням притискачу і матриці спеціального профілю та витягування з одночасною дією тягучого зусилля за стінку zdeформованої заготовки, яке створюється пуансоном спеціального профілю. Показано моделюванням і підтверджено експериментами, що застосування деформуючого інструменту спеціального профілю приводить до зменшення зусилля витягування та збільшення ступеню деформації при формоутворенні за один перехід.

Постановка завдань. Метою роботи є скорочення кількості переходів холоднолистового штампування та підвищення якості деталей при виготовленні порожнистих конусних виробів з міді.

Завданнями дослідження передбачено проведення скінченно-елементного моделювання в середовищі DEFORM 2D переходів витягування і обтиску із визначенням зусиль деформування, напруженого і деформованого станів, вичерпаного ресурсу пластичності деформованого металу та встановлення форми і розмірів напівфабрикату і готового виробу.

Схеми з позначеннями для витягування напівфабрикату в конусній матриці спеціального профілю та подальшого обтиску цього напівфабрикату приведено на рис. 2. Тут ліворуч від вісі симетрії зображено положення на початку формоутворення, а праворуч – на кінцевій стадії. На рис. 2а наведено схему витягування листову заготовку 1 встановлено між матрицею 2 і притискачем 3. Деформування зусиллям Pd здійснюється пуансоном 4, який переміщується зі швидкістю V_0 . В результаті витягування отримується напівфабрикат 5 з конусною і циліндричною частинами. Для

вилучення напівфабрикату 5 в нижній плиті 6 передбачено виштовхувач 7. Форму деформуючої поверхні конусної матриці 2, що має виступи і впадини, утворено перетином торів з діаметром перерізу d_1 , які розташовано з кроком t (рис. 2б). Деформована заготовка при витягуванні контактує тільки з виступами цієї поверхні. Це приводить до зниження зусилля деформування завдяки зменшенню впливу сил тертя. Схему другого переходу обтиску зображено на рис. 2в.

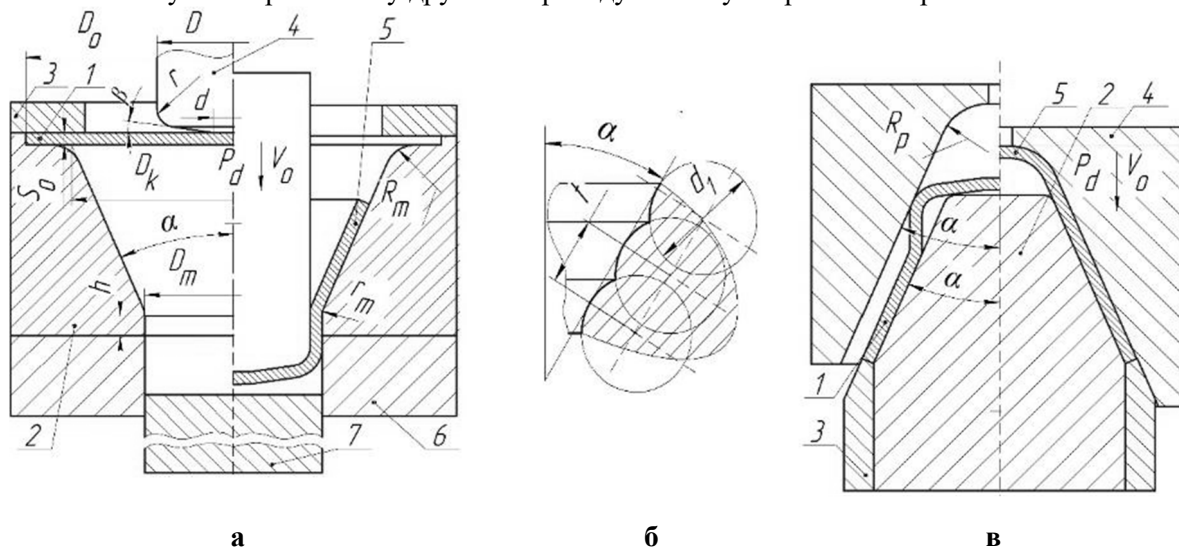


Рис. 2. Формоутворення конусного виробу з використанням витягування в конусній матриці та подальшого обтиску: а – схема витягування в конусній матриці, б – профіль деформуючої поверхні матриці, в – схема обтиску напівфабрикату з отриманням конусного виробу

Напівфабрикат після витягування 1 розміщено на пуансоні 2 і опорі 3. При опусканні матриці 4 здійснюється обтиск циліндричної частини та отримується виріб 5.

Розміри заготовки і інструменту при витягуванні та обтиску: $D_0=100$ мм; $S_0=1,8$ мм; $D_k=90$ мм; $D_m=43$ мм; $R_m=6$ мм; $r_m=20$ мм; $h=9$ мм; $\alpha=25,5^\circ$; $d_1=6$ мм; $t=3$ мм; $D=40$ мм; $r=12$ мм; $d=8$ мм, $\beta=2^\circ$; $R_p=6$ мм.

При моделюванні обтиску враховано деформації, які отримано на переході витягування. Застосовано пружно-пластичну модель металу, що дозволило виявити розміри напівфабрикату і виробу з урахуванням пружної деформації. В обох випадках формоутворення швидкість деформування складала $V_0=2$ мм/сек, а вплив тертя визначено по Кулону з коефіцієнтом тертя $\mu=0,1$.

Викладення основного матеріалу. На рис. 3 зображено в розрізі положення заготовки і деформуючого інструменту при моделюванні витягування напівфабрикату. Положення на початку витягування показано на рис. 3а. Заготовку 1 встановлено між матрицею 2 і притискачем 3. Зусилля прикладається за допомогою пуансону 4. Для виштовхування напівфабрикату передбачено виштовхувач 5. На рис. 3б наведено положення в кінці витягування після опускання пуансону 4 з отриманням напівфабрикату 6.

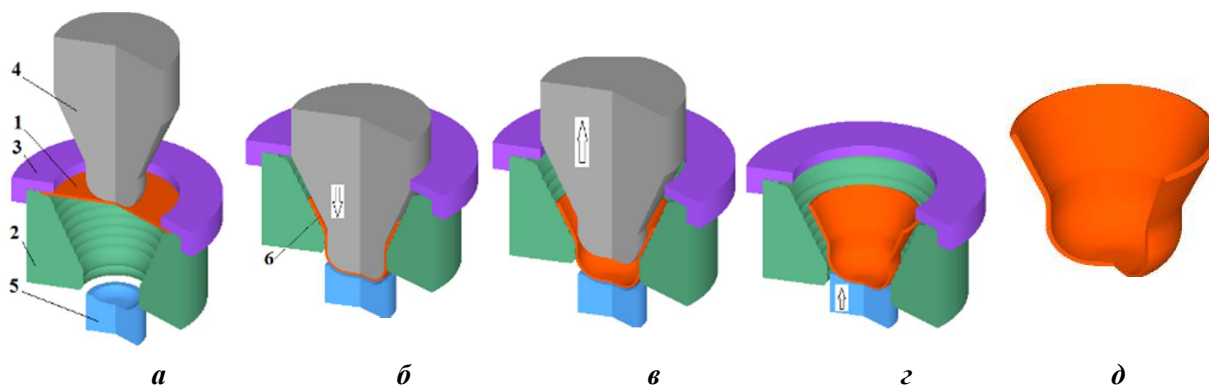


Рис. 3. Положення в розрізі заготовки і інструменту при моделюванні витягування та вигляд напівфабрикату: а – на початку витягування, б – в кінці витягування, в – після виймання пуансону із напівфабрикату, г – після виштовхування напівфабрикату із матриці, д – вигляд напівфабрикату

При зворотному русі пуансону напівфабрикат 6 залишається в матриці 2(рис. 3в) і виштовхується при переміщенні вгору виштовхувача 5. Положення після виштовхування напівфабрикату 6 із матриці 2 зображено на рис. 3г, а вигляд напівфабрикату 6 – на рис. 3д. Напівфабрикат має конусну частину з кутом по ескізу виробу і циліндричну частину, яка підлягає подальшому обтиску.

Графіки зусиль, що виникають при отриманні напівфабрикату показано на рис. 4. На рис. 4а зображено графік залежності зусилля витягування від переміщення пуансону. Зусилля постійно зростає та досягає максимального значення 61,4 кН в кінці витягування. Використання пружно-пластичної моделі металу дозволило визначити зусилля вилучення пуансону із деформованої заготовки та зусилля виштовхування напівфабрикату із матриці. Залежність зусилля вилучення від зворотного переміщення пуансону наведено на рис. 4б. Найбільшу величину зусилля 2,1 кН отримано на проміжній стадії вилучення. Також на проміжній стадії досягає максимального значення 0,25 кН зусилля виштовхування напівфабрикату із матриці (рис. 4в).

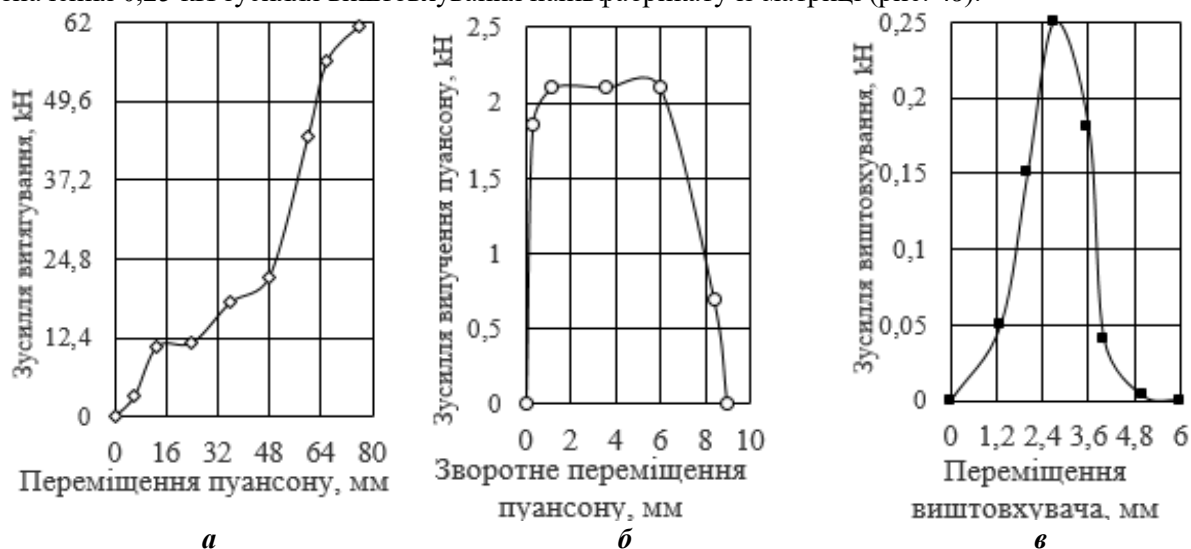


Рис. 4. Графіки зусиль при отриманні напівфабрикату: а – залежність зусилля витягування від переміщення пуансону, б – залежність зусилля вилучення пуансону від його зворотного переміщення, в - залежність зусилля виштовхування від переміщення виштовхувача

Розподіли у половині напівфабрикату радіальних σ_r , осьових σ_z , тангенціальних σ_θ та інтенсивності σ_i напружень представлено на рис. 5.

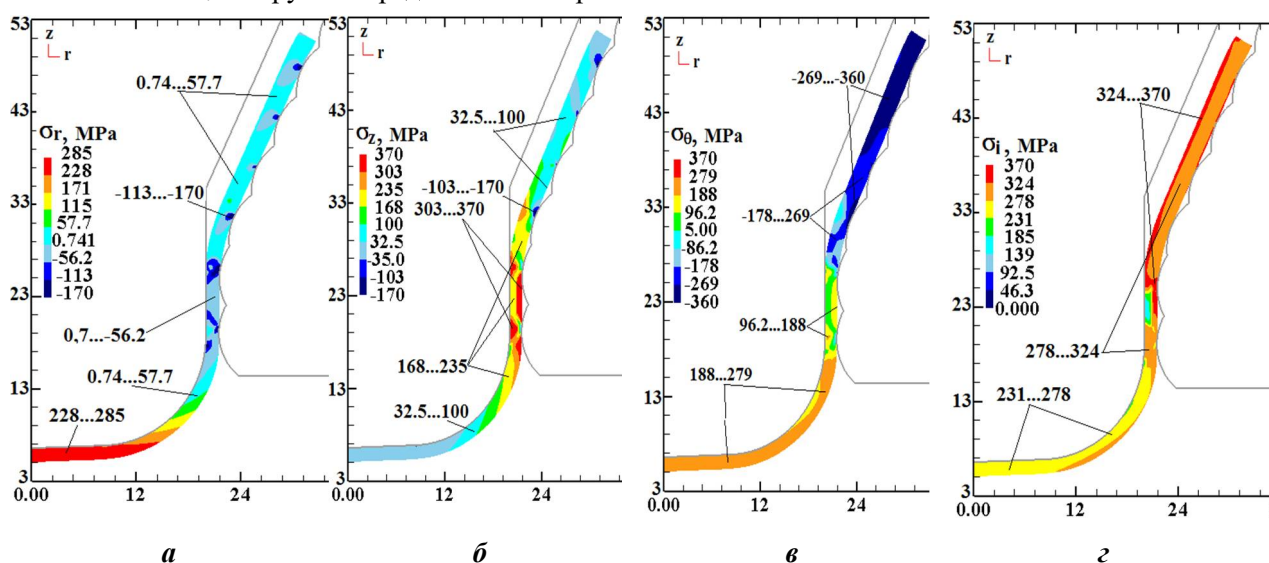


Рис. 5. Розподіли у половині напівфабрикату радіальних σ_r , осьових σ_z , тангенціальних σ_θ та інтенсивності σ_i напружень: а – розподіл σ_r , б – розподіл σ_z , в - розподіл σ_θ , г – розподіл σ_i

Тут і на подальших рисунках тонкими лініями зображено контури деформуючого інструменту, а розміри по всіх координат z і r показано в міліметрах. У донній частині напівфабрикату виникають розтягувальні радіальні напруження у межах $\sigma_r=228\div 280$ МПа (рис. 5а). В місцях контакту конусної частини з виступами матриці отримано стискаючі напруження $\sigma_r=-113\div -170$ МПа, по яких можна оцінити питомі зусилля для проектування штампового оснащення. Найбільші значення розтягувальних осьових напружень у межах $\sigma_z=303\div 370$ МПа виникають у циліндричній частині напівфабрикату (рис. 5б). У конусній частині ці напруження зменшуються до значень $\sigma_z=32,5\div 100$ МПа. У циліндричній і донній частині напівфабрикату отримано розтягувальні тангенціальні напруження σ_θ , які у донній частині досягають найбільших величин у межах $\sigma_\theta=188\div 279$ МПа (рис. 5в). У більшій частині об'єму конусної частини напівфабрикату ці напруження отримано стискаючими зі значеннями $\sigma_\theta=-269\div -360$ МПа. Інтенсивність напружень досягає величин $\sigma_i=324\div 370$ МПа у конусній і циліндричній частинах та $\sigma_i=231\div 278$ МПа у донній частині (рис. 5г). По вказаних значеннях σ_i в першому наближенні можна прогнозувати напруження текучості zdeформованого металу, яке в конусній і циліндричній частинах буде $\sigma_s=345$ МПа, а в донній частині - $\sigma_s=250$ МПа.

На рис. 6 показано розподіли у половині напівфабрикату радіальних ε_r , осьових ε_z , тангенціальних ε_θ , інтенсивності ε_i деформацій, вичерпаного ресурсу пластичності ψ та форма і розміри напівфабрикату, які отримано після виштовхування його із матриці.

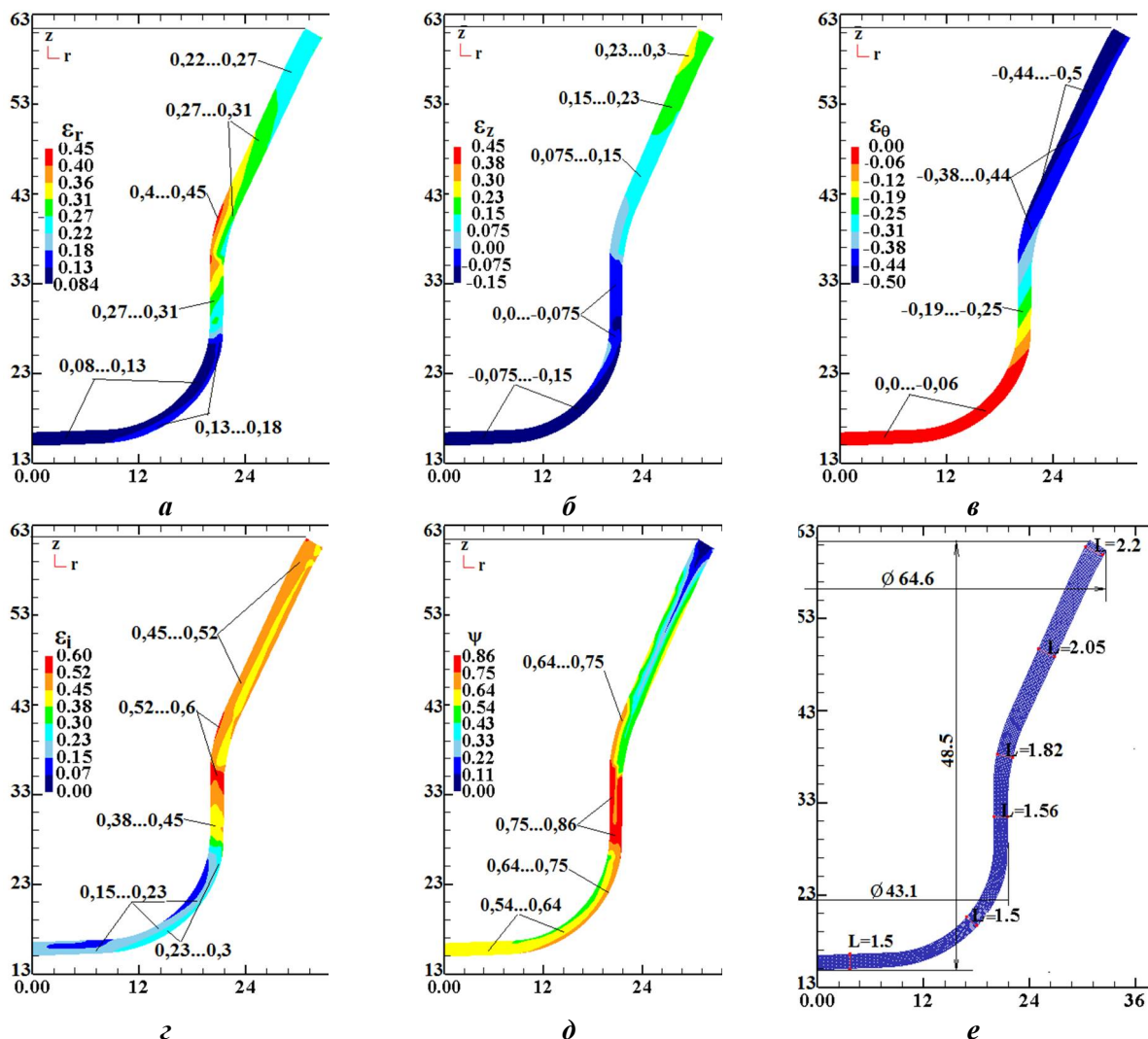


Рис. 6. Розподіли у половині напівфабрикату радіальних ε_r , осьових ε_z , тангенціальних ε_θ , інтенсивності ε_i деформацій, вичерпаного ресурсу пластичності ψ та розміри напівфабрикату: а – розподіл ε_r , б – розподіл ε_z , в – розподіл ε_θ , г – розподіл ε_i , д – розподіл ψ , е – розміри напівфабрикату

По всьому об'єму напівфабрикату виникають розтягувальні радіальні деформації з досягненням максимальних величин у межах $\varepsilon_r=0,4\div0,45$ в місці переходу конусної частини в циліндричну з подальшим зменшенням до значень $\varepsilon_r=0,22\div0,27$ в зоні торцю конусної частини (рис. 6а). По середині висоти циліндричної частини отримано $\varepsilon_r=0,22\div0,27$, а на радіусі заокруглення цієї частини в донну - $\varepsilon_r=0,13\div0,18$. Найбільші розтягувальні осьові деформації $\varepsilon_z=0,23\div0,3$ виникають в зоні торцю конусної частини напівфабрикату з подальшим зменшенням до місця переходу конусної частини в циліндричну (рис. 6б). Практично по всьому об'ємі напівфабрикату отримано стискаючі тангенціальні деформації ε_θ . Ці деформації починають зростати по абсолютній величині від циліндричної частини ($\varepsilon_\theta=-0,19\div-0,25$) до конічної частини ($\varepsilon_\theta=-0,44\div-0,5$). Пропрацювання структури металу холодною пластичною деформацією при витягуванні можна оцінити по розподілу інтенсивності деформацій ε_i у напівфабрикаті (рис. 6з). У конусній частині отримано $\varepsilon_i=0,45\div0,52$. Циліндрична частина має зону з максимальними значеннями $\varepsilon_i=0,52\div0,6$ із подальшим зменшенням до $\varepsilon_i=0,38\div0,45$ на початку радіусу заокруглення. Встановлені напруження і деформації дозволили виявити ступінь використання ресурсу пластичності ψ у zdeформованому металі напівфабрикату. Найбільші величини вичерпаного ресурсу у межах $\psi=0,75\div0,86$ отримано в зоні циліндричної частини (рис. 6д). При $\psi = 1$ починається руйнування металу.

Розміри в міліметрах напівфабрикату зображено на рис. 6е. На торці напівфабрикату діаметром 64,6 мм товщина стінки складає $L=2,2$ мм, посередині цієї частини отримано $L=2,05$ мм, а в місці переходу конусної частини в циліндричну – $L=1,82$ мм. Стінка циліндричної частини має товщину $L=1,56$ мм. У донній частині стінка потоншується з товщини $S_0=1,8$ мм до $L=1,5$ мм.

На рис. 7 зображено положення напівфабрикату, виробу і деформуючого інструменту при моделюванні обтиску. Положення на початку обтиску приведено на рис. 7а. Напівфабрикат 1 встановлено на пуансоні 2 і торцем спирається на опору 3. Деформування здійснюється матрицею 4, при опусканні якої отримується виріб 5 (рис. 7б). При зворотному переміщенні матриці 4 виріб залишається на пуансоні 2 (рис. 7в). На рис. 7г показано вигляд виробу з розрізом.

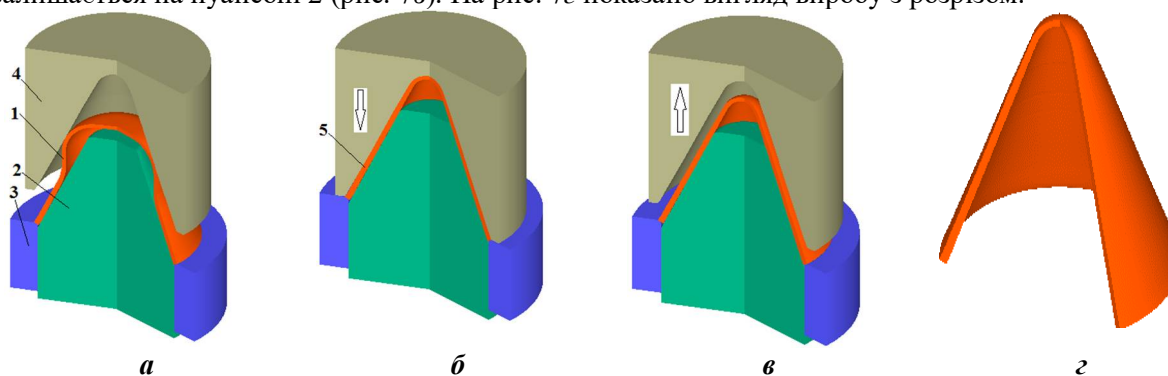


Рис. 7. Положення в розрізі заготовки і інструменту при моделюванні обтиску та вигляд виробу з розрізом: а – на початку обтиску, б – в кінці обтиску, в – після виймання матриці із виробу, г – вигляд виробу з розрізом

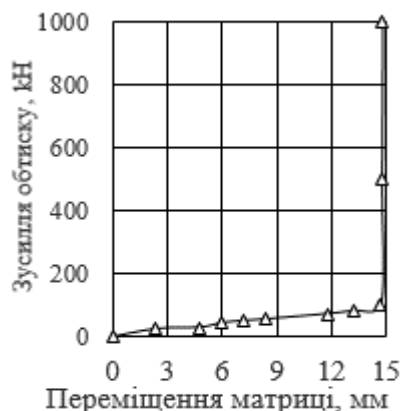


Рис. 8. Залежність зусилля обтиску від переміщення матриці

напружень змінюється від $\sigma_i=250\div300$ МПа до $\sigma_i=350\div400$ МПа (рис. 9з).

Графік залежності зусилля обтиску від переміщення матриці показано на рис. 8. Безпосередньо для обтиску достатньо зусилля 100 кН, а потім відбувається вирівнювання (калібрування) конусної частини по всій довжині виробу і завершується при зусиллі 1000 кН.

Розподіли компонент напружень у половині виробу в кінці обтиску показано на рис. 9. Інтерес представляють напруження, які виникають в місці перетворення циліндричної частини в конічну. У вказаному місці виникають стискаючі радіальні напруження і змінюються у межах $\sigma_r=-260\div-380$ МПа в області вершини конусу до значень $\sigma_r=-10\div-130$ МПа у прилеглий зоні (рис. 9а). Для осьових напружень отримано $\sigma_z=-37\div-170$ МПа у вершині конусу і $\sigma_z=-310\div-450$ МПа у прилеглий зоні. В наведених місцях тангенціальні напруження досягають значень у межах $\sigma_\theta=-290\div-410$ МПа (рис. 9в), а інтенсивність

На рис. 10 зображено розподіли у половині виробу радіальних ε_r , осьових ε_z , тангенціальних ε_θ , інтенсивності ε_i деформацій, вичерпаного ресурсу пластичності ψ та форму і розміри виробу

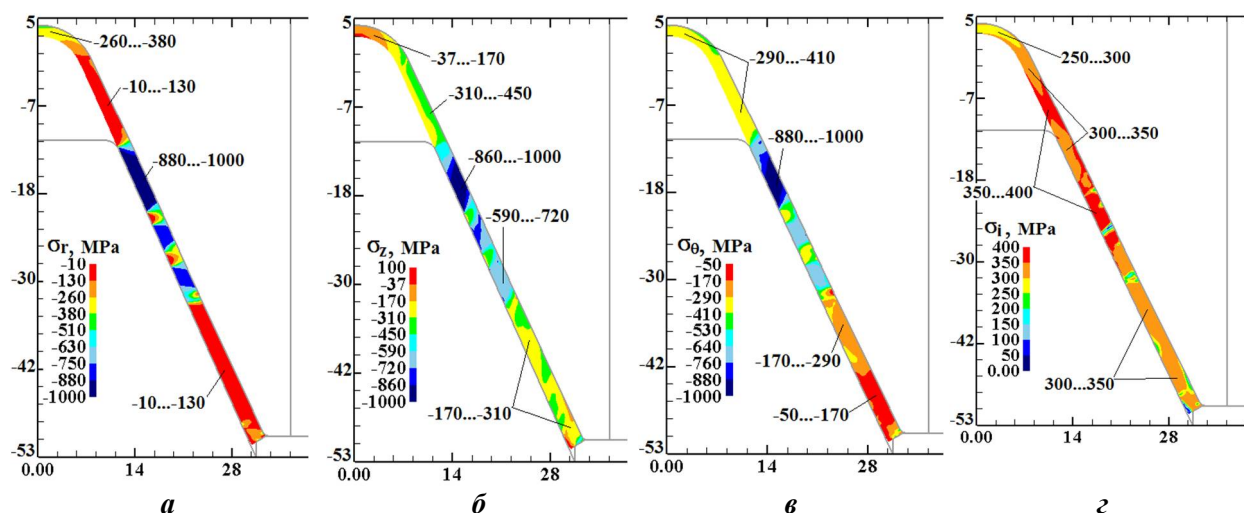


Рис. 9. Розподіли у половині виробу радіальних σ_r , осьових σ_z , тангенціальних σ_θ та інтенсивності σ_i напружень: а – розподіл σ_r , б – розподіл σ_z , в – розподіл σ_θ , з – розподіл σ_i

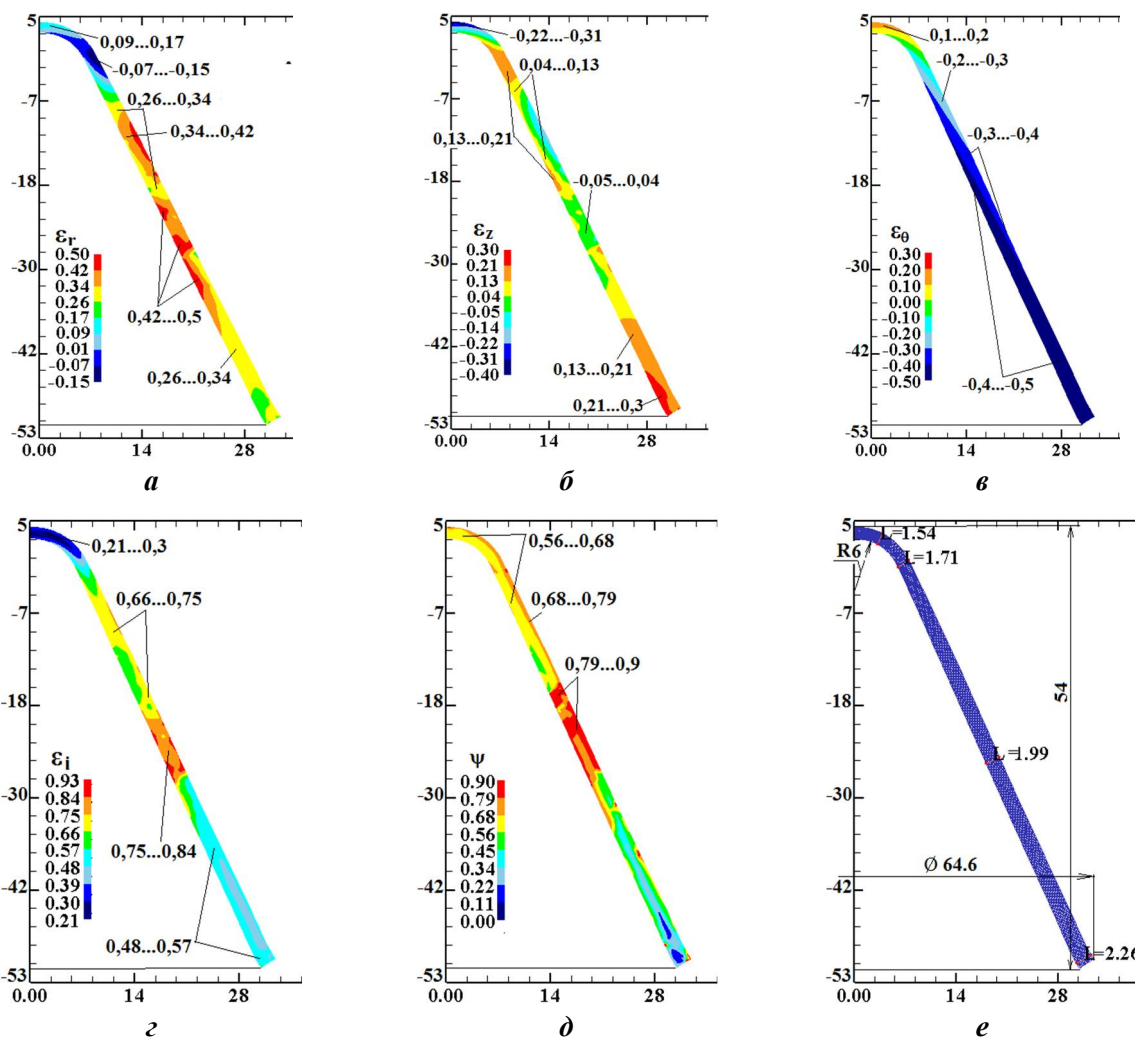


Рис. 10. Розподіли у половині напівфабрикату радіальних ε_r , осьових ε_z , тангенціальних ε_θ , інтенсивності ε_i деформацій, вичерпаного ресурсу пластичності ψ та форма і розміри половини виробу: а – розподіл ε_r , б – розподіл ε_z , в – розподіл ε_θ , з – розподіл ε_i , д – розподіл ψ , е – форма і розміри виробу

після обтиску. По всьому об'єму обтиснутої частини виникають розтягувальні радіальні деформації з досягненням максимальних величин у межах $\varepsilon_r=0,34\div 0,42$ (рис. 10а). В області вершини конусу отриманостискаючі осьові деформації зі значеннями $\varepsilon_z=-0,22\div -0,31$ (рис. 10б), а тангенціальні деформації стають розтягувальними з досягненням величин $\varepsilon_\theta=0,1\div 0,2$. Нижче по висоті обтиснутої частини відбувається зростання по абсолютній величині стискаючих деформацій ε_θ . Пропрацювання структури металу холодною пластичною деформацією після обтиску також оцінено по розподілу інтенсивності деформацій ε_i у виробі (рис. 10г). У обтиснутій частині отримано найбільші значення у межах $\varepsilon_i=0,66\div 0,75$. Зростання інтенсивності деформацій привело до збільшення вичерпаного ресурсу пластичності ψ у zdeформованому металівиробу, розподіл якого з найбільшими значеннями $\psi=0,79\div 0,9$ приведено на рис. 10д.

При формоутворенні обтиском відбувається потовщення стінки обтиснутої частини виробу, форму і розміри якого в міліметрах зображено на рис. 10 е. На вершині конусу отримано товщину стінки $L=1,54$ мм з подальшим зростанням до $L=1,71$ у обтиснутій частині.

Для підвищення точності розмірів виробу, що отриманий за два переходи (витягування і обтиску), по товщині стінки і знизити витрати металу можна використати три підходи. Перший підхід полягає в отриманні витягуванням напівфабрикату із конусною частиною з меншим кутом (див рис. 2а), а на другому переході одночасно із обтиском здійснити роздачу цієї частини за допомогою конусного пуансону з кутом конусу згідно ескізу виробу (див. рис. 1). При роздачі відбувається потоншення стінки і завдяки цьому зменшиться товщина конусної частини. Сутність другого підходу полягає у використанні третьої операції ротаційного видавлювання, яке забезпечить постійну товщину стінки по довжині конусної частини виробу і приведе до зменшення діаметру вихідної листової заготовки. Третій підхід передбачує використання профільованої вихідної листової заготовки, що має збільшену товщину в центральній частині та зменшену змінну товщину периферійної частини (для врахування потоншення донної частини та потовщення конусної частини напівфабрикату при витягуванні). Також у цьому випадку товщина центральної частини заготовки повинна бути вибрана з урахуванням потовщення стінки на другому переході обтиску. Профілювання заготовки можна здійснити штампуванням обкочуванням або ротаційним видавлюванням.

Висновки. 1. За допомогою МСЕ створені пружно-пластичні моделі та проведено розрахунковий аналіз двохперехідного штампування високих конусних виробів із міді за допомогою витягування і обтиску взамін існуючої технології витягування за чотири переходи; 2. При витягуванні напівфабрикату встановлено залежності зусильдеформування, виймання пуансону та виштовхування напівфабрикату із матриці від переміщення деформуючого інструменту. Визначено напруження, деформації, вичерпаний ресурс пластичності у zdeформованому металі та форму і розміри напівфабрикату після витягування; 3. З урахуванням деформацій і вичерпаного ресурсу пластичності після першого переходу витягування проведено моделювання обтиску. Виявлено зусилля обтиску, напруження, підсумковий zdeформований стан і вичерпаний ресурс пластичності, встановлено форму і розміри готового виробу; 4. Подальші дослідження в цьому напрямку необхідно проводити по визначенню форми і розмірів вихідної профільованої листової для зменшення або усунення різнотовщинності по довжині конусної частини виробів та зниження витрат металу.

Список використаних джерел.

1. Dixit P.M., Dixit U.S. Modeling of Metal Forming and Machining Processes by Finite Element and Soft Computing Methods. London: Springer. 2008. 590 p.
2. Altan T., Tekkaya E. Sheet Metal Forming: Processes and Applications. ASM International. 2012. 450 p.
3. Калюжний О.В., Калюжний В.Л. Інтенсифікація формоутворюючих процесів холодного листового штампування К: ТОВ «Сік Груп Україна», 2015. 292 с.
4. Venkateswarlu G., Davidson M. J. and Tagore G. R. N. Influence of process parameters on the cup drawing of aluminium 7075 sheet. International Journal of Engineering, Science and Technology Vol. 2, No. 11, 2010. Pp. 41-49. <https://doi.org/10.4314/ijest.v2i11.64553>.
5. Xiaojing Liu, Weiyang Liu, Cong Wang, Qingjuan Zhao Numerical simulation of aluminum alloy conical cup forming by Hydro-mechanical deep drawing College of Materials Science and Engineering Harbin University of Science and Technology Harbin, China, Conference: 2011 6 th International Forum on Strategic Technology (IFOST) <https://doi.org/10.1109/IFOST.2011.6020998>.

6. Kapustova M., Sobota R. Slovak University of Technology in Bratislava, Faculty of Materials Science and Technology in Trnava / Institute of Production Technologies, J. Bottu 25, 91724 Trnava, Slovakia. MATEC Web of Conferences 95, 10008, IC-MME. 2017. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20179510008>.
7. Ameen H.A., Abdulridha O.H. Effect of clearance and blank thickness on stress distribution in elliptical deep drawing without blank holder using ANSYS International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), ISSN: 2278-0181. Vol. 5. Issue 08. 2016. Pp. 360-367.
8. Zein H., El Sherbiny M., Abd-Rabou M., El shazly M. Thinning and spring back prediction of sheet metal in the deep drawing process. Materials & Design. Vol.53. 2014. Pp. 797-808. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.07.078>.
9. Choubey A. K., Sasikumar C. Effect of anisotropy, temperature, strain rate on deep drawing using conical die. Journal of Metallic Material Research ISSN: 2630-5135 (Online). Vol. 3, Iss. 1. 2020. <https://doi.org/10.30564/jmmr.v3i1.920>.
10. Dwivedi R., Choubey A. K., Purohit R., Rana R.S. Experimental and numerical analysis of aluminium alloy cylindrical cup using novel deep drawing technique. Advances in Materials and Processing Technologies. 2021. Pp. 1831-1844. <https://doi.org/10.1080/2374068X.2021.1878701>.
11. Vedpathak V.S., Tadamalle A.P., Burande D. H. Evaluation of Deep Drawing Force in Sheet Metal Forming International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). Vol. 8. Issue 07. 2019. <http://www.ijert.org> ISSN: 2278-0181 IJERTV8IS070378.
12. Malekipour E., Majd N. Sh., Sharifi E., Hossein H. Observation on the behavior of ultrasonic micro-hammer and its effects on the deep drawing process: Numerical simulation and experimental study. Ultrasonics. Vol. 119. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2021.106566>.
13. Kumbhar S.V. Pressure Optimization and Failure Prediction for Deep Drawing Process of Sheet Metal Products: A Case Study. Journal Failure Analysis and Preven. Vol.18. 2018. Pp. 948-956. <https://doi.org/10.1007/s11668-018-0485-6>.
14. Wang, J., Goel, A., Yang, F. *et al.* Blank optimization for sheet metal forming using multi-step finite element simulations. International Journal of Advanced Manufacturing Technology. V. 40. 2009. Pp. 709-720. <https://doi.org/10.1007/s00170-008-1383-y>.
15. Shewakh W. M., Hassan M A., Hassab-Allah I. M. Square-Cup Deep Drawing of Relatively Thick Sheet Metals through a Conical Die without Blankholder. International Journal of Materials Forming and Machining Processes, N. 2(2). 2015. Pp. 31-46. <https://doi.org/10.4018/IJMFMP.2015070103>.
16. Kumbhar S.V. Case Studies in Failure Analysis Through Simulation of Deep Drawing Process of Sheet Metal Products: A Brief. Journal of Failure Analysis and Prevention. Vol. 21. 2021. Pp. 1575-1581. <https://doi.org/10.1007/s11668-021-01207-6>.
17. Luyen T., Tong V., Nguyen D. A simulation and experimental study on the deep drawing process of SPCC sheet using the graphical method. Alexandria Engineering Journal. V. 61. Issue 3. 2022. Pp. 2472-2483. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.07.009>.
18. Demirci H. I., Mustafa Y., Demiray K., Karalı M. The theoretical and experimental investigation of blank holder forces plate effect in deep drawing process of AL 1050. Materials & Design. Vol. 29, Issue 2. 2008. Pp. 526-532. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2007.01.008>.
19. Fu P., Zhang Y., Bao Y. *et al.* Finite element simulation and experimental study of non-blank holder forward and backward composite deep drawing earing test. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology Vol. 129. 2023. Pp. 4301-4316. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-12584-7>.
20. Kumar P., Elangovan S., Chealvan S. *et al.* Experimental and Simulation Study on Deep Drawing Process to Reduce Earing. In: Natarajan, E., Vinodh, S., Rajkumar, V. (eds) Materials, Design and Manufacturing for Sustainable Environment. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Singapore. 2023. https://doi.org/10.1007/978-981-19-3053-9_31.
21. Kaliuzhnyi V.L., Markov O.E., Aliieva L.I. *et al.* Investigation of hot combined extrusion of steel hollow conical parts. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences. 2024. <https://doi.org/10.1007/s40430-024-05032-4>.
22. Kaliuzhnyi O.V., Kaliuzhnyi V.L., Aliiev I.S. *et al.* Investigation of variants of deep drawing of steel hollow parts. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences. Vol. 47(1). 2025. Pp. 1-14. <https://doi.org/10.1007/s40430-024-05330-x>.

Рецензент: Луговський Олександр Федорович, д.т.н., професор Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»